

تأثیر پلیمر الیاف شیشه بر مقاومت مکانیکی تیرچه‌های I- شکل ساخته شده از چندسازه لایه‌ای (LVL) و چوب رشته موازی (PSL)

چکیده

استفاده از فرآورده‌های چوبی مهندسی‌شده در صنعت ساخت‌وساز به دلایل مختلف فنی و اقتصادی نظیر نسبت بالای مقاومت به وزن، عدم محدودیت در دسترسی به ابعاد مختلف و امکان تولید با استفاده از ضایعات به‌طور مداوم در حال افزایش هستند. تیرچه‌های I شکل یکی از انواع فرآورده‌های مهندسی‌شده چوبی هستند که خواص آنها با توجه به نحوه طراحی و نوع مواد به‌کاررفته در آن قابل کنترل است. این مطالعه با هدف بررسی تقویت تیرچه‌های I- شکل ساخته‌شده با الوار تراشه موازی و تخته چندلایه حاصل از نی و / یا صنوبر تقویت‌شده با الیاف شیشه و رزین اپوکسی انجام شده است. عوامل متغیر این تحقیق شامل نوع جان و بال تیرچه بود. ویژگی‌های مکانیکی تیرچه‌های ساخته‌شده شامل مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته، مقاومت برشی جان، مقاومت فشاری موازی بال و مقاومت فشاری حد تناسب بال مورد بررسی و آزمون قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و از آزمون دانکن برای گروه‌بندی میانگین‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد استفاده از الوار لامینه تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه در جان تیرچه نسبت به الوار لامینه شده معمولی باعث بهبود ۴۹/۶ درصدی مدول گسیختگی، ۷۳/۱۷ درصدی مدول الاستیسیته، ۵۵/۵۵ درصدی مقاومت برشی جان، ۱۶/۴۱ درصدی مقاومت فشاری موازی بال و ۲۰/۶۵ درصدی مقاومت فشاری حد تناسب بال گردید. همچنین استفاده از الوار لامینه شده صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه در بال تیرچه‌ها نسبت به الوار لامینه شده صنوبر معمولی، الوار تراشه موازی و الوار تراشه موازی نی تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه دارای عملکرد مکانیکی بسیار بهتری بود.

واژگان کلیدی: تیرچه‌های I- شکل، الیاف شیشه، مقاومت‌های مکانیکی، الوار لامینه شده تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه.

مقدمه

کمیود ماده اولیه از جدی‌ترین چالش‌های حال حاضر دنیا و از جمله ایران در بخش تولید فرآورده‌های چوبی و توسعه سازه‌های چوبی است. از این‌رو، تقاضای جهانی پسماندهای لیگنوسولوزی در سراسر جهان، در حال

افزایش است. این تقاضا و همچنین مقررات جدید محیطی در راستای کاهش انتشار گازهای آلاینده و توسعه سازه‌های سبز [۱] تولیدکنندگان را مجبور به جستجوی منابع جایگزین از مواد لیگنوسولوزی کرده است، موضوع

حانیه شوروژی^۱
محمد شمسیان^۲
علی بیات کشکولی^۳
محمد دهمرده قلعه‌نو^۴

^۱ دانشجوی دکتری فرآورده‌های چندسازه چوب، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، ایران

^۲ دانشیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، ایران

^۳ استاد، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۴ استادیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

مسئول مکاتبات:

Haniye.shurvazi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰

در مقیاس جهانی، محققین و مهندسين با تغيير و تحولات در فرايندهای توليد با ساخت فرآورده‌های جديد چوبی با حداقل مصرف چوب ماسيم و افزايش کاربرد آنها به اين اصل مهم دست‌یافته‌اند [۱۱]. یکی از اين فرآورده‌ها، تيرچه‌های I شکل مهندسی‌شده با استفاده از LVL یا LSL^۶ در بال و تخته‌لایه یا OSB در جان تيرچه است که نسبت به تيرهای چوبی دارای وزن کمتر و مقاومت بیش‌تر و کارآمدتر هستند. اين تيرچه‌ها با توجه به نوع طراحی می‌توانند در سیستم‌های سقف و کف استفاده شوند [۱۳].

مواد مختلفی برای تقویت تيرچه‌های I شکل معرفی شده است. یکی از مهم‌ترین اين مواد پلیمر تقویت‌شده با الياف (GFRP) است. در سال‌های اخير، استفاده از کامپوزیت‌های GFRP^۷ به دليل امکان جایگزینی مواد سنتی در کاربردهای مختلف، به سرعت افزايش یافته است. GFRP یک ماده کامپوزیتی است که دارای ماتریس پلیمری بوده و با الياف تقویت‌شده (از جنس شیشه، کربن، آرامید، یا بازالت) است. جنس پلیمر نیز معمولاً اپوکسی، رزین استر وینیل، یا پلی‌استر ترموست است، هرچند از رزین‌های فنیل فرمالدئیدی نیز استفاده می‌شود [۱۴ و ۱۵]. عوامل مختلفی بر خواص تيرچه‌های I شکل مؤثر است که نوع ماده مورد استفاده و نوع طراحی شامل وضعیت اتصال جان به بال، ابعاد سطح مقطع تيرچه از مهم‌ترین آنها محسوب می‌شوند. با توجه به اهمیت استفاده از پسماندهای کشاورزی در ساخت فرآورده‌های مهندسی‌شده چوب، در اين تحقيق در نظر است که تيرچه‌های I- شکل ساخته شده با الوار تراشه موازی حاصل از نی و چندسازه لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الياف شیشه (GFRP) مورد مطالعه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده در اين پژوهش ضایعات لایه‌های چوب صنوبر با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر از کارخانه چوب بری پویا، ساقه‌های نی از نيزارهای اطراف نیشابور تهیه شد. الياف شیشه از شرکت مقاوم سازان افزير تهران و با ضخامت ۰/۱۶ میلی‌متر با دانسیته ۴۲۰ گرم بر سانتی‌متر

ضایعات کشاورزی و محصولات زیستی آن یکی از اولویت‌های تحقیقات امروزی هستند [۲ و ۳]. همچنين، مشخص‌شده است که افزايش توليد محصولات مختلف زراعی و در نتیجه افزايش میزان زیست‌توده و توليد فرآورده‌ای با ارزش‌افزوده زیاد از پسماندهای کشاورزی، منجر به افزايش تأثیر اقتصادی و زیست‌محیطی و افزايش رفاه اجتماعی در مناطق محلی می‌شود [۴]. محصولات مهندسی‌شده چوب برای رفع مشکلات چوب جامد توسعه یافته‌اند. اين خانواده از محصولات از چند گروه مانند الوارهای کامپوزیتی ساختاری، پانل‌های بر پایه چوب شامل تخته لایه، PSL^۱، LVL^۲، OSB^۳ و ... تشکیل شده‌اند [۵، ۶ و ۷]. توسعه محصولات چوبی مهندسی‌شده عموماً ویژگی‌های خوبی از قبیل سفتی و مقاومت بالا، ثبات و یکنواختی محصول، قابلیت دسترسی در ابعاد بزرگ و هزینه‌های نصب کم دارند. همچنين، الوارهایی با اندازه بزرگ را می‌توان از درختان سریع‌الرشد مانند صنوبر یا پسماندهای لیگنوسولوزی باکیفیت پایین توليد کرد. الوارهای چندسازه هم از نظر یکنواختی کیفیت و یکپارچگی، برتری زیادی نسبت به الوارهای چوب ماسيم دارند [۸ و ۹].

تيرچه‌های I شکل یکی از انواع فرآورده‌های مهندسی‌شده چوبی مرکب از یک جان^۴ در مرکز و دو بال^۵ در بالا و پایین، تیری با مقطعی به شکل حرف I انگلیسی هستند که خواص آنها با توجه به طراحی و نوع مواد به‌کاررفته در آن قابل‌کنترل است [۱۰ و ۱۱]. تيرچه‌های I- شکل چوبی با ساختار خاصی که دارند در کاربردهای متعدد سازه‌ای قابل استفاده‌اند. در اين تيرچه‌ها، تنش برشی ایجادشده بر روی تيرچه را، جان تيرچه و بارهای خمشی اعمال‌شده بر روی تيرچه را، بال‌های تيرچه تحمل می‌کند [۱۲]. به طور متداول، مصالح ساختمانی برای ساخت‌وسازهای مسکونی و سبک در جهان، چوب ماسيم بوده است، اما در طی چند دهه گذشته، با توجه به کاهش کیفیت و کمیت منابع چوب ماسيم و جنگل‌های طبیعی

^۱ parallel strand lumber

^۲ Laminated veneer lumber

^۳ Oriented Strand Board

^۴ Web

^۵ Flange

^۶ Laminated strand lumber

^۷ Glass Fiber Reinforced Polymer

های تقویت شده نیز انجام گرفت و به جای چسب اوره فرمالدهید از الیاف شیشه و رزین اپوکسی (GFRP) استفاده شد. میزان اختلاط رزین اپوکسی و هاردنر ۷۰ به ۳۰ در نظر گرفتن شد. الیاف شیشه تک‌لایه در هر سطح چیده شده و سطح لایه‌ها با رزین اپوکسی توسط پیستوله پوشیده شد. برای تخته‌های PSL، تراشه‌های نی به صورت موازی در قالب مخصوص چیده شد و برای نمونه‌های معمولی از چسب اوره فرمالدهید و برای نمونه‌ای تقویت شده الیاف شیشه و رزین اپوکسی استفاده گردید. پس از آماده کیک و انجام پیش پرس تخته تحت دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به مدت زمان ده دقیقه قرار گرفتند (انتخاب این درجه حرارت و فشار پرس به صورت تجربی و در آزمایشگاه بر اساس بهترین نتایج به دست آمده صورت گرفت). در نهایت هشت تخته برای جان و ۱۶ تخته برای بال ساخته شده با توجه به نوع تیمار تمامی آنها کدگذاری شدند. به دلیل نبود استاندارد آزمایشگاهی برای ساخت تیرچه‌های I- شکل مونتاژ کردن جان و بال به صورت تجربی انجام گرفت بدین صورت که ابتدا پس از علامت گذاری وسط بال شیار به عمق پنج میلی‌متر توسط اهر گرد میزی در آنها ایجاد شد برای اتصال جان و بال به یکدیگر از چسب سفید نجاری و برای ایجاد استحکام بیشتر از گیره نجاری استفاده شد. در نهایت ۲۴ تیرچه چوبی I- شکل با قید سه تکرار برای هر آزمایش ساخته شد (شکل ۱).

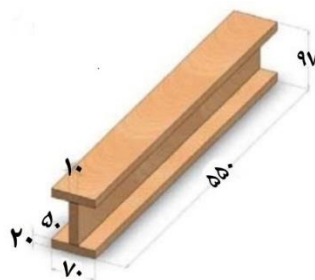
مکعب و مقاومت کششی ۲۳۰۰ مگاپاسکال تهیه شد. چسب اپوکسی با نام تجاری EPIKOTE 828 و هاردنر مورد استفاده با نام تجاری EPIKURE F205 از شرکت مقاوم سازان افزایش تهران تهیه شد. میزان ویسکوزیته رزین اپوکسی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ۱۲-۱۴ سانتی‌پواز بود. میزان اپوکسی موجود در رزین در حدود ۵۲۶۰ تا ۵۴۲۰ میلی‌مول بر کیلوگرم از سوی سازنده گزارش شد. چسب اوره فرمالدهید به صورت پودر از شرکت سامد خریداری شد و به صورت محلول ۶۰٪/مورد استفاده قرار گرفت.

ساخت تیرچه‌های I شکل:

در ساخت تیرچه‌های I- شکل از LVL و PSL استفاده شد. تیرچه‌های چوبی از جان و بال تشکیل شده است که برای جان دو تیمار و برای بال چهار تیمار در نظر گرفته و برای هر تیمار مطابق جدول یک، سه تکرار ساخته شد. تیرچه‌های I- شکل با ابعاد (۱×۲۲×۵۵) سانتی‌متر برای جان و (۲×۷×۵۵) سانتی‌متر برای بال‌ها ساخته شدند. برای ساخت LVL ابتدا لایه‌های صنوبر در ابعاد مناسب سایز بری انجام گرفت سپس در قالب مربوطه لایه‌ها به تعداد هفت‌لایه برای جان و ۱۴ لایه برای بال‌ها چیده شد. برای چسباندن لایه‌ها به هم از چسب اوره فرمالدهید به همراه هاردنر دو درصد کلرید آمونیوم بر اساس ۲۰۰ گرم چسب به ازای هر مترمربع به‌وسیله پیستوله بر روی سطح هر لایه اسپری شد. همین روش ساخت برای نمونه-

جدول ۱- تیمارهای تیرچه‌های I شکل ساخته به همراه علائم اختصاری

شماره تیمار	نوع جان	نوع بال و تقویت آن	تکرار
۱	LVL	LVL	۳
۲	LVL	LVL تقویت شده با FRP	۳
۳	LVL	PSL	۳
۴	LVL	PSL تقویت شده با FRP	۳
۵	LVL تقویت شده با FRP	LVL	۳
۶	LVL تقویت شده با FRP	LVL تقویت شده با FRP	۳
۷	LVL تقویت شده با FRP	PSL	۳
۸	LVL تقویت شده با FRP	PSL تقویت شده با FRP	۳



شکل ۱- تیرچه‌های I شکل ساخته شده در این مطالعه

در این فرمول M_{max} حداکثر لنگر است از دیاگرام لنگر خمشی با توجه به خمش سه نقطه در وسط تیر اتفاق می‌افتد و از رابطه (۲) به دست می‌آید که P_{max} حداکثر نیرو و L طول بین دو تکیه‌گاه می‌باشد.

$$M_{max} = \frac{P_{max} \cdot L}{4} \quad (2)$$

در رابطه (۱) Y_{max} دورترین نقطه از محور خنثی است بنابراین نصف ارتفاع (d) تعیین شد.

$$= \frac{d}{2} Y_{max} \quad (3)$$

به دلیل اینکه تیر مقطع مستطیلی ندارد ممان اینرسی از رابطه (۴) تعیین شد.

$$I = \frac{w(d-2f)^3}{12} + 2\left(\frac{bf^3}{12} + bf\left(\frac{d}{2} - \frac{f}{2}\right)\right) \quad (4)$$

ریخت‌شناسی مقطع شکست تیرچه‌ها استفاده شد. برای این منظور ابتدا پس از تهیه نمونه از تیمارها مقداری از نمونه را در ویال مربوطه ریخته و در دستگاه اولتراسونیک در زمان ۱۵ دقیقه دیسپرس شد، این کار جهت جدا شدن ذرات از هم و عدم کلوخه شدن بود تا تصاویر واضح و با کیفیتی از نمونه حاصل شود. نمونه روی گریدهای مخصوص ریخته و پس از خشک شدن در داخل دستگاه متالایزر قرار داده شد، این کار جهت ایجاد پوشش طلا برای رسانا شدن سطح نمونه انجام شد. نمونه‌ها با بزرگنمایی ۳۰ برابر عکس برداری شدند.

اندازه‌گیری مقاومت‌ها: مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته تیرها طبق استاندارد ASTM D5456 با دستگاه آزمون مکانیکی HOUNSFILD مدل H25KS واقع در آزمایشگاه مکانیک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل اندازه‌گیری شدند. مطابق استاندارد برای آزمون‌های مقاومت خمشی، مقاومت برشی جان، مقاومت فشاری موازی بال و مقاومت حد تناسب بال، طول دهانه ۵۰۰ میلی‌متر و سرعت بارگذاری ۲/۵ میلی-متر بر دقیقه اعمال شد (۱-۵)

$$MOR = \frac{M_{max} \cdot Y_{max}}{I} \quad (1)$$

I : ممان اینرسی تیر، w ضخامت جان تیر، d ارتفاع تیر، f ضخامت بال تیر، b عرض بال تیر می‌باشد. مدول الاستیسیته از رابطه (۵) محاسبه گردید.

$$MOE = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (5)$$

P بار اعمال شده به تیر، L طول دهانه، δ خیز تیر و I ممان اینرسی می‌باشد.

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FESEM)

از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FE-SEM) مدل TESCAN- MIRA3 برای بررسی ویژگی

روش تجزیه و تحلیل آماری

با توجه به متغیرهای مورد مطالعه در این تحقیق نتایج به دست آمده در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از آزمایش فاکتوریل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ضمن رعایت پیش فرض‌های لازمه مانند نرمال بودن داده‌ها، از آنالیز واریانس توسط نرم افزار SPSS استفاده شد. همچنین پس از ثبت معنی داری نتایج، به منظور گروه بندی میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن (DMRT) در سطح ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

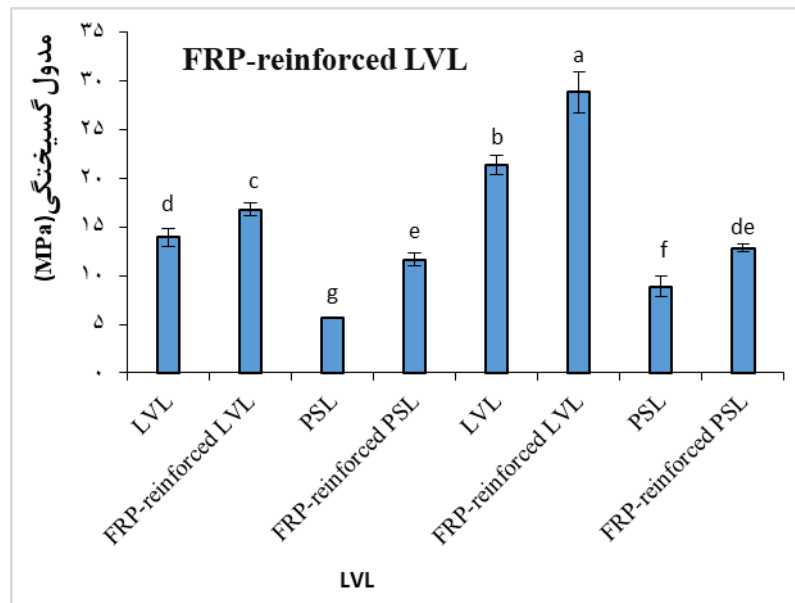
مدول گسیختگی (MOR)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نوع جان و نوع بال بر مقاومت خمشی تیرچه‌های I- شکل در سطح ۱ درصد معنی دار است (جدول ۲). طبق شکل ۲ مقاومت خمشی تیرچه‌های ساخته شده با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه بیش تر از تخته الوار لایه‌ای صنوبر معمولی است. در بررسی اثر مستقل نوع بال بر مقاومت خمشی مشخص گردید که مقاومت خمشی تیرچه‌های ساخته شده با تخته الوار لایه‌ای صنوبر

تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه بیش تر است که طبق گروه بندی دانکن در ۴ گروه مختلف طبقه بندی شده اند (شکل ۲). تأثیر متقابل نوع جان × نوع بال در شکل ۲ ارائه شده است. بیش ترین مقاومت خمشی مربوط به تیرهای ساخته شده از جان تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه و بال تخته الوار لایه‌ای تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه بود به نحوی که میزان مقاومت خمشی آن ۷۸٪ نمونه آزمونی ساخته شده از تخته الوار لایه‌ای برای جان و تخته تراشه موازی برای بال‌ها بود. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از لایه‌های پلیمر الیاف شیشه موجب بهبود خواص مکانیکی تیرچه‌های I- شکل شده است. چوب طبیعی ماده‌ای ارتوتروپیک (خواص مکانیکی در جهات مختلف) است. این ماده بیولوژیک به دلیل وجود رطوبت و عیوب ظاهری همواره در معرض تخریب قرار دارد و از طرفی وجود ترک و نقص‌های ذاتی در طی فرآیندهای تبدیلی چوب موجب شکست سریع آن می‌گردد تقویت چند سازه لایه‌ای با پلیمر الیاف شیشه مانع تکثیر و رشد این نواقص شده است [۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶].

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع جان و نوع بال بر مقاومت خمشی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی داری	تفاوت
نوع جان (A)	۲۱۳/۹۶۵	۱	۲۱۳/۹۶۵	۲۰۶/۸۹۸	۰/۰۰۰	**
نوع بال (B)	۸۱۱/۴۸۲	۳	۲۷۰/۴۹۴	۲۶۱/۵۵۹	۰/۰۰۰	**
A×B	۱۰۴/۳۳۲	۳	۳۴/۷۷۷	۳۳/۶۲۸	۰/۰۰۰	**
خطا	۱۶/۵۴۷	۱۶	۱/۰۳۴			
مجموع	۱۲۰/۸۷۹	۳۵				



شکل ۲- اثر متقابل نوع جان و نوع بال بر مقاومت خمشی

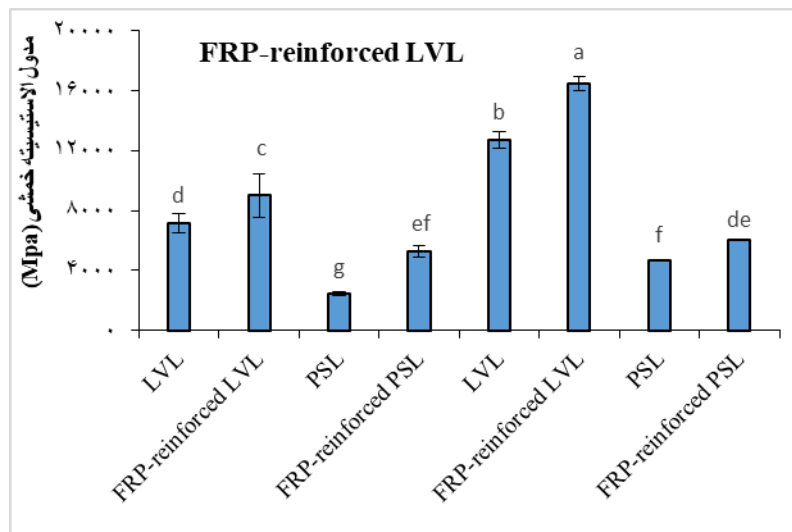
است. مدول الاستیسیته خمشی مربوط به تیرهای ساخته‌شده از تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه و بال تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه ۸۷/۵٪ نمونه آزمونی ساخته شده از تخته الوار لایه‌ای برای جان و تخته تراشه موازی برای بال‌ها بود. استفاده از پلیمر شیشه در چند سازه لایه‌ای موجب از بین رفتن تنش به دور از مقاومت بحرانی شد به نحوی که نتایج استخراج شده نشان داد مقاومت خمشی نمونه های تقویت شده به میزان ۷۱/۷٪ افزایش یافته است [۱۷]. از دیگر مزایای استفاده از الیاف شیشه استفاده از گونه‌های چوبی با دانسیته کم نظیر صنوبر می باشد که علاوه بر کاهش وزن سازه‌های چوبی مقاومت خمشی قابل قبولی خواهیم داشت [۲۰].

مدول الاستیسیته خمشی (MOE)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل و متقابل نوع جان و نوع بال بر مدول الاستیسیته خمشی تیرچه‌های I- شکل در سطح ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۳). مدول الاستیسیته خمشی تیرچه‌های ساخته‌شده با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه بیشتر از تخته الوار لایه‌ای صنوبر معمولی است. در بررسی اثر مستقل نوع بال بر مدول الاستیسیته خمشی مشخص گردید که مدول الاستیسیته خمشی تیرچه‌های ساخته‌شده با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه بیشتر است که طبق گروه‌بندی دانکن در ۴ گروه مختلف طبقه‌بندی شده‌اند. تأثیر متقابل نوع جان × نوع بال بر مدول الاستیسیته خمشی در شکل ۳ ارائه شده

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع جان و نوع بال بر مدول الاستیسیته خمشی تیرچه‌های I- شکل

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری	تفاوت
نوع جان (A)	۹۰۶۱۹۰۷۵/۶۹	۱	۹۰۶۱۹۰۷۵/۶۹	۲۱۳/۴۵۶	۰/۰۰۰	**
نوع بال (B)	۳۰۲۱۱۶۰۵۲	۳	۱۰۰۷۰۵۳۵۰/۷	۲۳۷/۲۱۵	۰/۰۰۰	**
A×B	۳۹۰۲۲۳۲۹/۴۵	۳	۱۳۰۰۷۴۴۳/۱۵	۳۰/۶۳۹	۰/۰۰۰	**
خطا	۶۳۶۷۹۷۸/۳۸۲	۱۶	۴۲۴۵۳۱/۸۹۲			
مجموع	۴۳۸۱۲۵۴۳۵/۵۲۲	۲۵				



شکل ۳- اثر متقابل نوع جان و نوع بال بر مدول الاستیسیته خمشی

بال الوار تراشه موازی بود. هرچند اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مقاومت برشی خط چسب جان و بال تیرهای ساخته‌شده از جان با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه و بال تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه نسبت به تیرهای ساخته‌شده از جان تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه و بال الوار تراشه موازی نی وجود نداشت. استفاده از الیاف شیشه با رزین اپوکسی افزایش تحمل تیر در برابر نیروی برشی شد [۲۱] تقویت در هر دو سطح کششی و فشاری با صفحات GFRP انجام شد. از آنجایی که الیاف شیشه مقاومت بالایی دارند هنگامی که با رزین به فرآورده مرکب چسبانده می‌شوند موجب افزایش مقاومت نهایی خواهند شد. ضخامت خط چسب در تیمارهایی که از چسب اپوکسی استفاده می‌شود، از موارد تعیین‌کننده در مقدار مقاومت چندسازه حاصل است [۲۵]. به نظر می‌رسد با افزایش ضخامت خط چسب که در ساخت چندسازه‌هایی با لایه گذاری دستی از جمله موارد اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود، احتمال ایجاد ترک‌های ریز و ترک‌های ستاره‌ای در ساختار ماتریس افزایش می‌یابد.

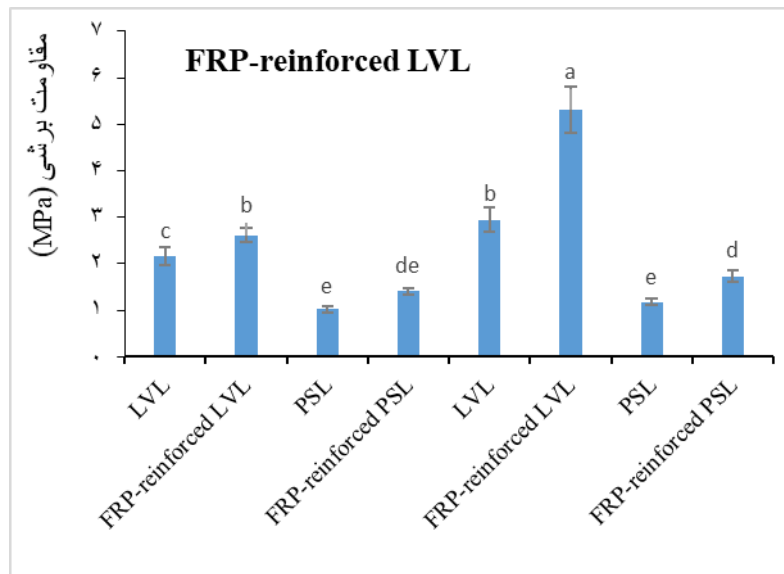
مقاومت برشی خط چسب در محل اتصال جان و

بال‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نوع جان و نوع بال بر مقاومت برشی خط چسب جان و بال تیرچه‌های I- شکل در سطح ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۴). مقاومت برشی خط چسب جان و بال تیرچه‌های ساخته‌شده با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه بیش‌تر از تخته الوار لایه‌ای صنوبر معمولی است. در بررسی اثر مستقل نوع بال بر مقاومت برشی خط چسب جان و بال مشخص گردید که این مقاومت در تیرچه‌های ساخته‌شده با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه بیش‌تر است که طبق گروه‌بندی دانکن در ۴ گروه مختلف طبقه‌بندی شده‌اند. تأثیر متقابل نوع جان × نوع بال بر مقاومت برشی خط چسب جان و بال در شکل ۴ ارائه شده است. مقاومت برشی خط چسب جان و بال مربوط به تیرهای ساخته‌شده از جان با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه و بال با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه ۸۰/۷۶٪ بیشتر از مدول الاستیسیته خمشی مربوط به تیرهای ساخته‌شده از جان با تخته الوار لایه‌ای صنوبر معمولی و

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع جان و نوع بال بر مقاومت برشی جان تیرچه‌های I- شکل

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری	تفاوت
نوع جان (A)	۵/۹۱۰	۱	۵/۹۱۰	۱۱۳/۱۰۷	۰/۰۰۰	**
نوع بال (B)	۲۸/۹۰۴	۳	۹/۶۳۵	۱۸۴/۳۸۴	۰/۰۰۰	**
A×B	۶/۲۱۲	۳	۲/۰۷۱	۳۹/۶۲۷	۰/۰۰۰	**
خطا	۰/۸۳۶	۱۶	۰/۰۵۲			
مجموع	۴۱/۸۶۲	۳۵				



شکل ۴- اثر نوع جان و نوع بال بر مقاومت برشی جان

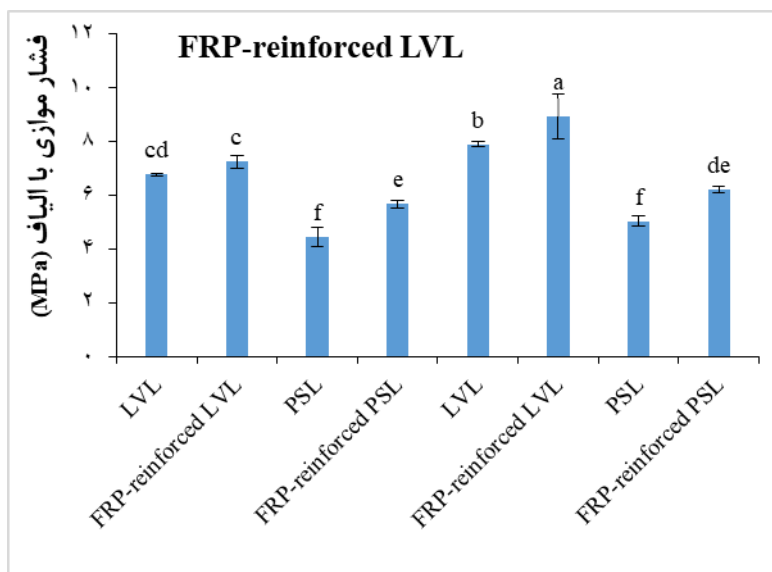
مقاومت فشاری موازی بال

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل نوع جان و نوع بال بر مقاومت فشاری موازی بال تیرچه‌های I- شکل در سطح ۱ درصد و اثرات متقابل نوع جان × نوع بال در سطح ۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۵). مقاومت فشاری موازی بال تیرچه‌های ساخته‌شده با تخته الوار لایه‌ای شده صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه بیش‌تر از تخته الوار لایه‌ای صنوبر معمولی است. در بررسی اثر مستقل نوع بال بر مقاومت فشاری موازی بال مشخص گردید که این مقاومت در تیرچه‌های ساخته‌شده با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه بیش‌تر است که طبق گروه‌بندی دانکن در ۴ گروه مختلف طبقه‌بندی شده‌اند. تأثیر متقابل نوع جان × نوع بال بر مقاومت فشاری موازی بال در شکل ۵ ارائه شده است. مقاومت فشاری موازی بال مربوط به تیرهای ساخته‌شده از جان با تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه و

بال الوار لایه‌ای شده صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه ۵۵/۵۵٪ بیشتر از مقاومت فشاری موازی بال مربوط به تیرهای ساخته‌شده از جان با تخته الوار لایه‌ای و بال الوار تراشه موازی نی بود. هرچند اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مقاومت فشاری موازی بال تیرهای ساخته‌شده از تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه و بال تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه نسبت به تیرهای ساخته‌شده از جان تخته الوار لایه‌ای صنوبر تقویت‌شده با پلیمر الیاف شیشه و بال الوار تراشه موازی نی وجود نداشت. ترک‌های ریز که پس از ساخت یا چند ماه پس از آن اتفاق می‌افتد یکی از معایب متداول در سازه‌های تقویت‌شده است. از آنجا که رزین‌های اپوکسی نسبت به سایر رزین‌ها از روانی کمتری برخوردارند در لایه گذاری دستی باعث افزایش ضخامت ماتریس شده و احتمال افزایش چنین معایبی در چندسازه‌هایی با ماتریس اپوکسی افزایش می‌یابد.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع جان و نوع بال بر مقاومت فشاری موازی بال تیرچه‌های I- شکل

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی داری	تفاوت
نوع جان (A)	۵/۸۳۱	۱	۵/۸۳۱	۵۰/۴۳۷	۰/۰۰۰	**
نوع بال (B)	۴۰/۰۰۸	۳	۱۵/۳۳۶	۱۱۵/۳۵۱	۰/۰۰۰	**
A×B	۱/۲۷۶	۳	۰/۴۲۵	۳/۶۷۹	۰/۰۳۵	*
خطا	۱/۸۵۰	۱۶	۰/۱۱۶			
مجموع	۴۸/۹۶۵	۳۵				



شکل ۵- اثر نوع جان و نوع بال بر مقاومت فشاری موازی بال

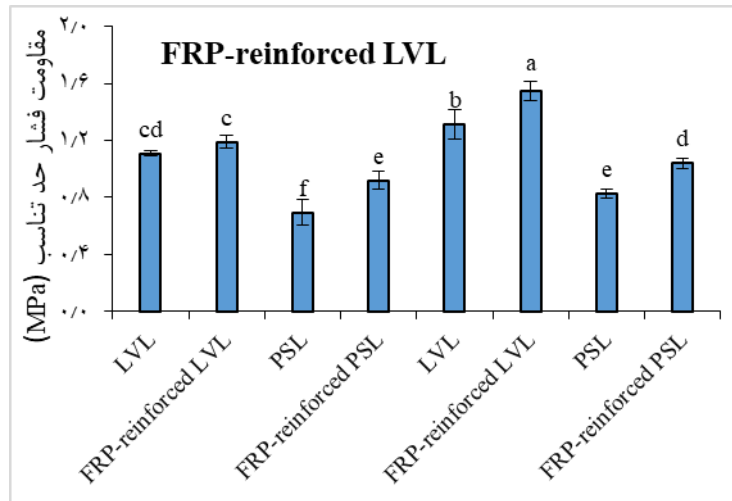
مقاومت فشاری حد تناسب بال

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل نوع جان و نوع بال بر مقاومت فشاری حد تناسب بال تیرچه‌های I- شکل در سطح ۱ درصد و اثرات متقابل نوع جان × نوع بال در سطح ۵ درصد معنی دار است (جدول ۶). مقاومت فشاری حد تناسب بال تیرچه‌های ساخته شده با تخته الوارلایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه بیشتر از تخته الوارلایه‌ای صنوبر معمولی است. در بررسی اثر مستقل نوع بال بر مقاومت فشاری حد تناسب بال مشخص گردید که این مقاومت در تیرچه‌های ساخته شده با تخته الوارلایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه بیشتر است که طبق گروه‌بندی دانکن در ۴ گروه مختلف طبقه‌بندی شده‌اند. تأثیر متقابل نوع جان × نوع بال بر مقاومت فشاری حد تناسب بال در شکل ۶ ارائه شده است.

مقاومت فشاری حد تناسب بال مربوط به تیرهای ساخته شده از جان تخته الوارلایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه و بال تخته الوارلایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه ۵۲/۹۴٪ بیشتر از مقاومت فشاری موازی بال مربوط به تیرهای ساخته شده از جان با تخته الوارلایه‌ای صنوبر معمولی و بال الوار تراشه موازی نی بود. طبق گروه‌بندی دانکن، اختلاف معنی داری بین مقادیر مقاومت فشاری حد تناسب بال تیرهای ساخته شده از جان با تخته الوارلایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه و بال الوار تراشه موازی نی نسبت به تیرهای ساخته شده از جان با تخته الوارلایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه و بال الوار تراشه موازی نی تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه وجود نداشت.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع جان و نوع بال بر مقاومت فشاری حد تناسب بال تیرچه‌های I- شکل

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری	تفاوت
نوع جان (A)	۰/۲۵۲	۱	۰/۲۵۲	۶۲/۷۱۱	۰/۰۰۰	**
نوع بال (B)	۱/۲۷۸	۳	۰/۴۲۶	۱۰۵/۹۳۹	۰/۰۰۰	**
A×B	۰/۰۵۲	۳	۰/۰۱۷	۴/۳۲۹	۰/۰۲۱	*
خطا	۰/۰۶۴	۱۶	۰/۰۰۴			
مجموع	۱/۶۴۶	۳۵				



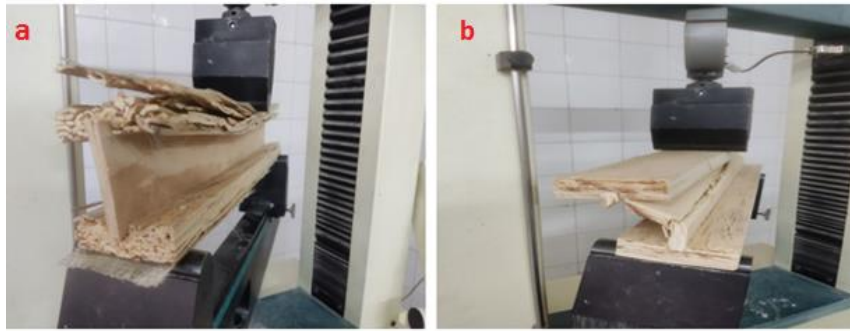
شکل ۶- اثر نوع جان و نوع بال بر مقاومت فشاری حد تناسب بال

قوی در آن است. در نمونه‌های تخته الوارلایه‌ای و الوار تراشه موازی نی تقویت نشده (a) و (b)، ساختار منظمی نسبت به نمونه‌های تخته الوارلایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه و الوار تراشه موازی نی تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه دیده نمی‌شود. در ساختارهای تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه در برخی موارد جدایش لایه‌های چندسازه از سطح چوب گسیختگی اتفاق افتاده است. با مشاهده نحوه شکست اتصالات مقاوم‌سازی شده می‌توان مشاهده نمود (شکل ۸). مقدار بازشدگی در اتصالات مکانیکی ساخته شده از تخته الوارلایه‌ای تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه و الوار تراشه موازی تقویت شده با الوار تراشه موازی دیده به مراتب کمتر از نوع تقویت نشده آن بود که بیانگر رخ دادن شکست‌های ریز در محل قرارگیری اعضای چوبی است.

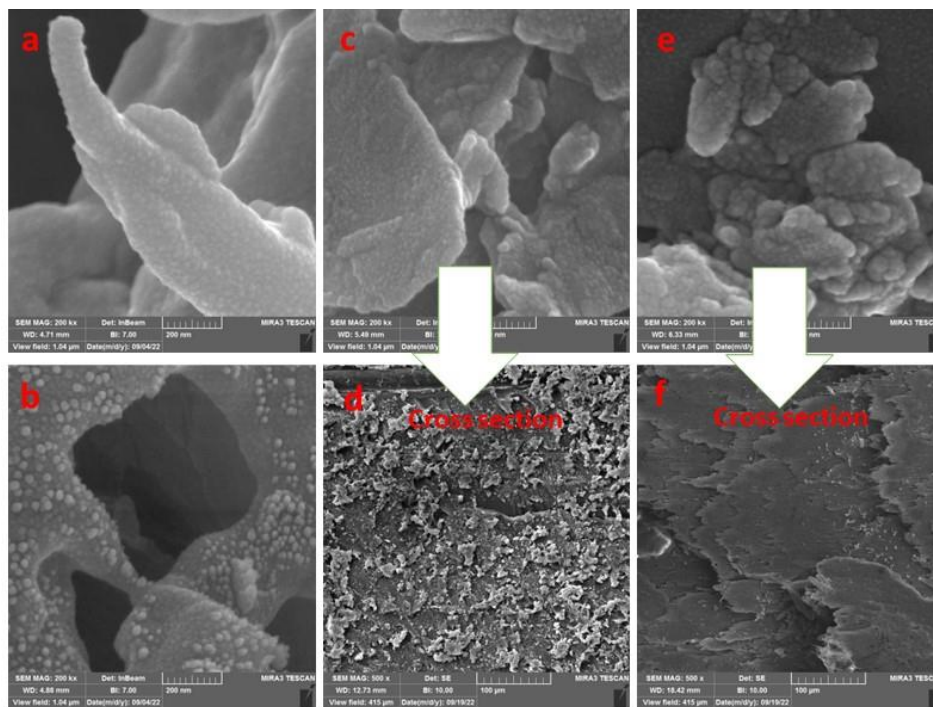
میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان

(FESEM)

تصاویر شکست تیرچه‌ها تحت نیروی فشاری در شکل ۷ ارائه شده است. طبق شکل ۷ (a)، به دلیل استفاده از تخته الوارلایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه در جان، عمده شکستگی آن در بال تیرچه دیده می‌شود، در حالی که طبق شکل ۷ (b) به دلیل استفاده از تخته الوارلایه‌ای صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه در بال، عمده شکستگی تیرچه در جان دیده می‌شود. میکروگراف‌های FESEM حاصل از نمونه‌های مختلف در شکل ۹ ارائه شده است. طبق این شکل، در نمونه‌های تخته الوارلایه‌ای تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه و الوار تراشه موازی نی تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه یک ساختار صاف و منظم دیده می‌شود که علت آن پیوندهای سطحی



شکل ۷- تصاویر شکست تیرچه‌ها. (a): تیرچه ساخته شده با جان الوار لامینه صنوبر تقویت شده یا پلیمر الیاف شیشه و بال الوار تراشه موازی نی، (b): تیرچه ساخته شده با جان الوار لامینه صنوبر تقویت شده یا پلیمر الیاف شیشه و بال الوار الوار لامینه شده صنوبر تقویت شده با پلیمر الیاف شیشه



شکل ۸- میکرو گراف‌های FESEM از سطح و مقطع عرضی شکست نمونه‌ها. (a): LVL، (b): PSL، (c): LVL تقویت شده با FRP (d): مقطع عرضی LVL تقویت شده با FRP (e): LVL تقویت شده با FRP (f): مقطع عرضی PSL تقویت شده با FRP

نتیجه‌گیری

تقاضای جهانی پسماندهای لیگنوسلولزی در سراسر جهان، به دلیل کمبود چوب و کاربردهای خاص آن در حال افزایش است. در این تحقیق، سعی شده است که تقویت تیرچه‌های I- شکل ساخته شده با الوار تراشه موازی (PSL) و تخته چندلایه تقویت شده با الیاف شیشه و رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد استفاده از LVL تقویت شده صنوبر با FRP در جان تیرچه نسبت به LVL صنوبر معمولی به طور معنی داری باعث

افزایش متغیرهای وابسته MOR، MOE، مقاومت برشی جان، مقاومت فشاری موازی بال و مقاومت فشاری حد تناسب بال شد. همچنین استفاده از LVL تقویت شده صنوبر با FRP در بال تیرچه‌ها نسبت به LVL، PSL و تقویت شده با FRP دارای عملکرد مکانیکی بسیار بهتری بود. با توجه به زمینه کاربرد تیرهای I- شکل در مکان‌های مختلف خارجی و داخلی، می‌توان مقاومت‌های مکانیکی آنها را با استفاده از LVL تقویت شده FRP (در جان و بال) بهبود داد و کاربرد FRP می‌تواند به عنوان راه‌حل مناسبی برای بهبود و یا تقویت تیرها باشد.

- [1] Kuram, E. 2022. Advances in development of green composites based on natural fibers. A review. *Emergent Materials*, 5(3), 811-831.
- [2] Nasir, M., Khali, D. P., Jawaid, M., Tahir, P. M., Siakeng, R., Asim, M. and Khan, T. A. 2019. Recent development in binderless fiber-board fabrication from agricultural residues: A review. *Construction and Building Materials*, 211, 502-516.
- [3] Echeverria, C. A., Pahlevani, F. and Sahajwalla, V. 2020. Valorisation of discarded nonwoven polypropylene as potential matrix-phase for thermoplastic-lignocellulose hybrid material engineered for building applications. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120730.
- [4] Hasan, K. F., Horváth, P. G. and Alpár, T. 2022. Lignocellulosic fiber cement compatibility: a state of the art review. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5409-5434.
- [5] Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeiri, I. and Guan, Z. 2020. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Developments in the Built Environment*, 1, 100004.
- [6] Sun, X., He, M. and Li, Z. 2020. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 249, 118751.
- [7] Gong, M. 2021. *Wood and Engineered Wood Products: Stress and Deformation*. In *Engineered Wood Products for Construction*. IntechOpen.
- [8] Markström, E., Kuzman, M. K., Bystedt, A., Sandberg, D. and Fredriksson, M. (2018). Swedish architects view of engineered wood products in buildings. *Journal of Cleaner Production*, 181, 33-41.
- [9] Milner, H. R. 2009. Sustainability of engineered wood products in construction. In *Sustainability of construction materials* (pp. 184-212). Woodhead Publishing.
- [10] Shahnewaz, M., Islam, M. S., Tannert, T. and Alam, M. S. (2019). Flange-notched wood I-joists reinforced with OSB collars: Experimental investigation and sensitivity analysis. In *Structures* (Vol. 19, pp. 490-498). Elsevier.
- [11] Spulle, U., Lipinskis, I. and Tuherm, H., 2017. Some bending properties of I-joists made with birch laminated plywood panels. *Drewno: prace naukowe, doniesienia, komunikaty*, 60.
- [12] Islam, M. S., Shahnewaz, M. and Alam, M. S. 2015. Structural capacity of timber I-joist with flange notch: Experimental evaluation. *Construction and Building Materials*, 79, 290-300.
- [13] Porteous, J. and Kermani, A. 2013. *Structural timber design to Eurocode 5*. John Wiley & Sons.
- [14] Singh, P., Singh, S., Ojha, R., Tiwari, P., Khan, S., Kumar, R. and Gupta, A. 2022. Characterization of Wear of FRP Composites: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- [15] Hollaway, L. C. 2010. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and building materials*, 24(12), 2419-2445.
- [16] Corradi, M., Vemury, C. M., Edmondson, V., Poologanathan, K. and Nagaratnam, B. 2021. Local FRP reinforcement of existing timber beams. *Composite Structures*, 258, 113363.
- [17] Borri, A., Corradi, M. and Grazini, A. 2003. FRP reinforcement of wood elements under bending loads. In *Proceedings of the 10th International Conference on Structural Faults+ Repair*, London, UK (Vol. 13).
- [18] Borri, A., Corradi, M. and Grazini, A. 2005. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites Part B: Engineering*, 36(2), 143-153.

- [19] Raftery, G. M. and Rodd, P. D. 2015. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. *Construction and building materials*, 91, 116-125.
- [20] Nazerian, M., Rezaian, A. and Shamsian, M. 2019. Effect of web configuration and flange type on bending strength of I-joist beams. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 34(2): 263-275. [In Persian]
- [21] Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñán, C. and Rubio-de Hita, P. 2015. Bending and shear reinforcements for timber beams using GFRP plates. *Construction and Building Materials*, 96, 461-472.
- [22] dela Rosa García, P., Escamilla, A. C. and García, M. N. G. 2013. Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. *Composites Part B: Engineering*, 55, 528-536.
- [23] Campilho, R. D. S. G., De Moura, M. F. S. F., Barreto, A. M. J. P., Morais, J. J. L. and Domingues, J. J. M. S. 2010. Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. *Construction and Building Materials*, 24(4), 531-537.
- [24] Alam, P., Ansell, M. P. and Smedley, D. 2009. Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements. *Composites Part B: Engineering*, 40(2), 95-106.
- [25] Fu, Q., Yan, L., Ning, T., Wang, B. and Kasal, B. 2020. Interfacial bond behavior between wood chip concrete and engineered timber glued by various adhesives. *Construction and Building Materials*, 238, 117743.

Reinforcement of I-Shaped Beams Constructed with Parallel Strand Lumber and Laminated Veneer Lumber Utilizing Glass Fiber Polymer

Abstract

The use of engineered wood products in the construction industry continues to grow due to various technical and economic reasons, such as high strength-to-weight ratio, unrestricted access to various dimensions, and the possibility of production using waste. I-shaped beams are a type of engineered wood product whose properties can be controlled according to the design and the type of materials used. This study investigates the reinforcement of I-shaped beams made of parallel strand lumber (PSL) and laminated veneer lumber (LVL) with glass fiber reinforced polymer (GFRP) and epoxy resin. The variable factors in this research included the type of web and flange. The mechanical properties of the manufactured beams, including bending strength, modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), shear strength of the web, compressive strength parallel to grain, and compressive strength proportional limit of the flange were investigated and tested. The obtained results were analyzed using a completely randomized design, and Duncan's test was used to group the means. The results showed that the use of LVL reinforced with GFRP in the web of the beam compared to unreinforced LVL resulted in a 49.6% improvement in MOR, a 73.17% improvement in MOE, a 55.55% improvement in shear strength of the web, a 16.41% increase in compressive strength parallel to the flange, and a 20.65% increase in the compressive strength proportional limit of the flange. Additionally, the use of LVL reinforced with GFRP in the flanges of the beams had a significantly better mechanical performance than unreinforced LVL, PSL, and parallel strand lumber reinforced with GFRP.

Keywords: I-shaped beams, glass fibers, mechanical resistances, laminated lumber reinforced with glass fiber polymer, parallel strand lumber.

H. Shoorvazi^{1*}
M. Shamsian²
A. Bayatkashkoli³
M. Dahmardeh Ghalehno⁴

¹ Ph.D Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

² Associate professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

³ Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Ira

⁴ Assistant Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

Corresponding author:
Haniye.shurvazi@gmail.com

Received: 2023/05/06
Accepted: 2023/12/01